

RECICLAJE DE LOS RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN COMO ÁRIDOS DE MEZCLAS BITUMINOSAS EN FRÍO

Breixo Gómez Meijide
Universidade da Coruña
breixo.gomez.meijide@udc.es

Ignacio Pérez Pérez
Universidade da Coruña
iperez@udc.es

Ana Rodríguez Pasandín
Universidade da Coruña
arodriguezpa@udc.es

Sabas Corraliza Tejeda
Director Técnico en ECOASFALT
scorraliza@ecoasfalt.es

RESUMEN

Los Residuos de Construcción y Demolición (RCD) han sido investigados como áridos en materiales de ingeniería civil, tales como hormigón o mezclas bituminosas en caliente. En la presente investigación, se estudia su aplicabilidad en mezclas bituminosas en frío, con el fin de mejorar los aspectos ecológicos y económicos de unas mezclas que, de por sí, ya son más sostenibles que las mezclas en caliente. Para comprobar si estos áridos afectan al comportamiento de la mezcla, se estudiaron una serie de propiedades mecánicas, como la sensibilidad al agua, la resistencia a tracción indirecta y la rigidez. Los resultados mostraron que los RCD no afectan de un modo negativo a las mezclas en frío, mejorando incluso algunos aspectos, en comparación con las mezclas de áridos naturales.

1 INTRODUCCIÓN

Los Residuos de Construcción y Demolición (RCD) son enormes masas de desechos sólidos que se producen cada vez que se procede a la demolición de una

estructura existente o a la construcción de una nueva, y cuya única alternativa hasta hace pocas décadas (y que todavía sigue siendo una práctica habitual en ciertas zonas y países) es la de su deposición en vertederos. Estos vertederos, sobre todo cuando no están controlados y regulados, suponen una serie de grandes daños al medio ambiente, como impacto visual y paisajístico, ruido, polvo, vibraciones, contaminación de suelos y acuíferos, deforestación y ocupación de suelo no aprovechable para la biodiversidad o para un uso social.

Los datos de producción de RCD varían entre distintas publicaciones aunque algunas como el Plan Nacional Integrado de Residuos 2008-2015 del Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino (PNIR, 2009) indican que es imposible estimar de forma exacta la producción de RCD en nuestro país. Aun así, las cifras suelen situarse entre los 30 y 40 millones de toneladas anuales, llegando a situar a España como 5º país europeo en producción de RCD hasta la llegada de la crisis económica (del Río, 2010).

Un segundo problema medioambiental, es la existente necesidad de áridos o materiales granulares durante las obras de construcción de nuevas instalaciones. Estos áridos provienen de depósitos sedimentarios, o de modo más habitual de la explotación de una o varias canteras, lo que supone también la generación de ruido, polvo, vibraciones, deforestación y ocupación de suelo. Además, una vez agotados los recursos naturales, las canteras suelen convertirse en zonas abandonadas cuyo estado natural puede tardar décadas en ser recuperado.

La necesidad de áridos puede ser enorme cuando las obras en cuestión son de gran envergadura, aspecto que suele ser común en las obras de tipo lineal, como las de construcción de carreteras. Por ello, y en el marco del desarrollo sostenible, se hace primordial el buscar nuevas fuentes que limiten la explotación de más recursos naturales.

En la presente investigación, se busca como solución a ambos problemas, el reciclaje de los RCD como áridos en mezclas bituminosas en frío, siguiendo con líneas similares de investigación en las que los RCD fueron introducidos en otros materiales de construcción, como el hormigón (González-Fonteboa y Martínez-Abella, 2007 y 2008) o las mezclas en caliente (Pasandín y Pérez, 2013, 2014 y 2015; Pérez et al., 2010).

Además de una serie ventajas medioambientales, las mezclas en frío, presentan otras ventajas sobre las mezclas en caliente, como una mayor flexibilidad que les permite adaptarse, sin romper, a las deformaciones permanentes de las capas inferiores, sobre todo cuando las explanadas son de mala calidad. También son almacenables, lo que les permite ser transportadas largas distancias sin necesidad de mantener una elevada temperatura que evite su prematuro endurecimiento y son más respetuosas con las condiciones de seguridad y salud de los operarios, tanto en plantas de fabricación como en obras de construcción. Recientes estudios de distintos organismos americanos han puesto de manifiesto que, fruto del manejo de mezclas bituminosas en caliente, los maquinistas de extendedoras y de tanques regadores, así como reglistas y personal que está en las inmediaciones de la obra, están sometidos a la agresión de una serie de compuestos nocivos muy superior a la que toleran las autoridades sanitarias y laborales. El empleo de emulsiones, especialmente si son de betún puro, elimina casi por completo estos riesgos. Las razones son tan evidentes que no es necesario insistir en ellas.

2 MATERIALES EMPLEADOS

Para el desarrollo de la presente investigación se emplearon dos tipos de áridos: Por un lado, se contó con una Corneana, árido 100% natural y de tipo silíceo y de uso común proveniente de una cantera en Astariz (Ourense) con el que se fabricarían las mezclas de control. Por otro lado, el árido 100% reciclado de RCD cuya composición se resumen en la Tabla 1. Las propiedades de ambos áridos se resumen en la Tabla 2. La emulsión empleada fue de tipo ECL-2d, catiónica con un 60% de betún residual con grado de penetración de 100.

El tipo de mezcla elegido fue una grava-emulsión GE1 (según clasificación en los Pliegos Técnicos de la ATEB) por su gran versatilidad y características mecánicas que las hacen aptas para capas de bases y subbases en carreteras con categorías de tráfico pesado T3 o superior. Debido a que los RCD se fragmentan más fácilmente, fue necesario ceñir la granulometría al huso inferior en la zona de los finos, puesto que tal y como se comprobó por medio de extracciones de betún, tras el mezclado y la compactación, los finos tendían a incrementarse desplazando la curva fuera del huso superior (Figura 1).

Tabla 1. Composición del árido reciclado (en % de peso seco)

Material	% en árido grueso (12/24 mm)	% en árido medio (6/12 mm)
Hormigón convencional y mortero	70%	55%
Áridos naturales sin mortero	25%	40%
Cerámicos	3.7%	4.1%
Hormigón con fibras metálicas	1.121%	< 0.001%
Hormigón con fibras textiles	0.146%	0.042%
Yeso y escayola	0.103%	0.012%
Otros (metal, papel, plástico, cristal)	<0.1%	<0.1%

Tabla 2. Características de los áridos reciclados y naturales

Propiedad	Árido reciclado	Árido natural
Índice de lajas (UNE EN 933-3)	4.5%	19.8%
Partículas trituradas (UNE EN 933-5)	89%	94%
Equivalente de arena (UNE EN 933-8)	77	78
Coefficiente de Los Angeles (UNE EN 1097-2)	38	14
Densidad aparente (UNE EN 1097-6)	2.64 t/m ³	2.78 t/m ³
Densidad seca (UNE EN 1097-6)	2.23 t/m ³	2.74 t/m ³
Densidad saturada SS (UNE EN 1097-6)	2.39 t/m ³	2.75 t/m ³
Absorción (UNE EN 1097-6)	7.0%	0.5%

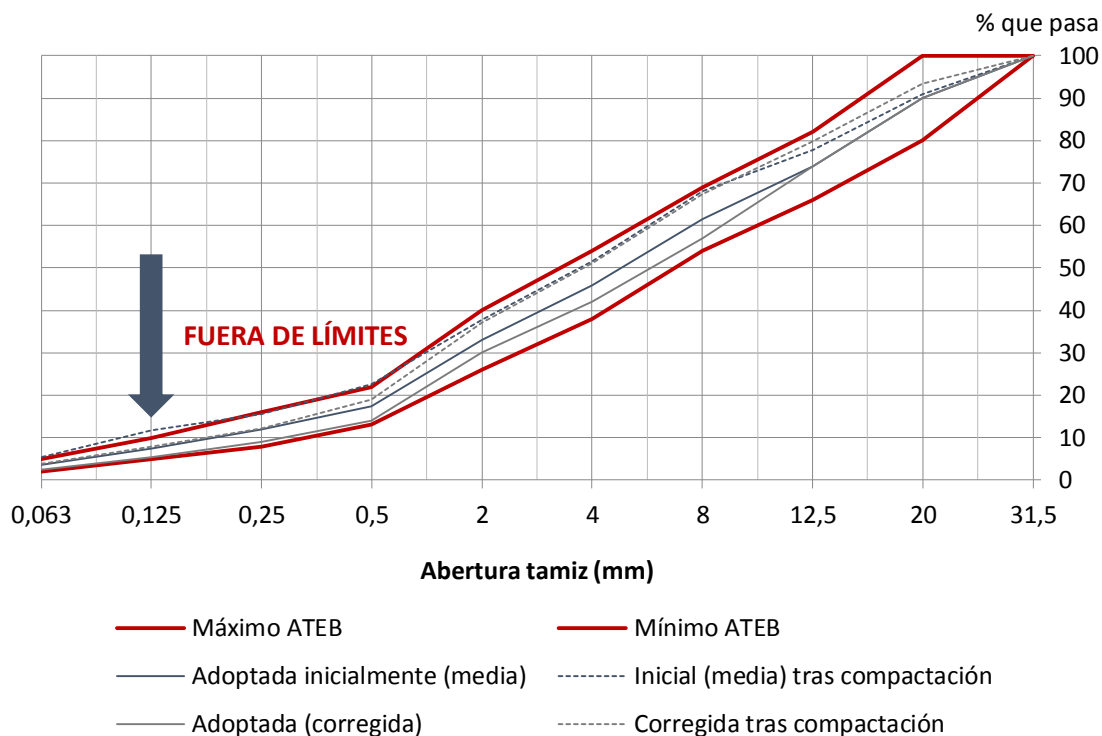


Figura 1. Evolución de las curvas granulométricas inicial y corregida tras la compactación

3 DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS

3.1 Fabricación de las probetas

En la presente investigación, se fabricaron todas las probetas según lo establecido en las Normas NLT-161 y NLT-162, de uso habitual en mezclas en frío. Con ello, se obtuvieron probetas cilíndricas de 101,6 mm de diámetro y 101,6 mm de altura con las que se realizaría el ensayo de inmersión-compresión (NLT-162). Para los ensayos de tracción indirecta (UNE-EN 12697-23) y módulo resiliente (UNE-EN 12697-26) se fabricaron del mismo modo para luego aplicar un corte por el plano medio y obtener dos probetas gemelas de 50 mm cada una (cada una de ellas destinada a un ensayo diferente). Este procedimiento permitió obtener probetas con idénticas propiedades intrínsecas sin importar el tamaño o el ensayo para el que fueron concebidas.

La compactación se realizó por medio de prensa estática con un esfuerzo máximo de 21 MPa aplicado durante 2 min. Las probetas fueron sometidas a un proceso de curado acelerado de 3 días en estufa ventilada a 50°C, de acuerdo con lo establecido en los Pliegos de la ATEB.

Se comprobó también que la cantidad de agua remanente en el interior de las probetas tras la compactación y el curado, apenas depende del contenido inicial aportado en el mezclado (Tabla 3). Aun así, fue necesario llegar a contenidos (iniciales) muy elevados hasta conseguir hallar el contenido óptimo para algunas propiedades (de hasta el 36% con RCD). Así, aunque las figuras y tablas estén referenciadas al contenido inicial, se deberá tener en cuenta que el contenido remanente es mucho menor, lo que indica que estas grandes cantidades de agua inicial son simplemente necesarias para evitar la prematura rotura de la emulsión al ser mezclada con un árido tan absorbente como los RCD.

Tabla 3. Contenidos de agua (en % peso árido seco) remanentes en las probetas tras su curado en estufa, en función de los contenidos de agua y betún aportados en la amasada

100% Árido Reciclado						100% Árido Natural			
% betún	Agua total en amasado (% peso árido seco)					% betún	Agua total en amasado (% peso árido seco)		
	9%	12%	15%	18%	21%		6%	9%	12%
2%	2,1%	2,2%	2,2%	2,1%	2,1%	2%	0,1%	0,1%	0,2%
3%	2,3%	2,4%	2,5%	2,5%	2,4%	3%	0,1%	0,2%	0,1%
4%	2,5%	2,9%	2,8%	2,9%	2,8%	4%	0,2%	0,2%	0,3%
5%	3,2%	3,2%	3,1%	2,8%	3,2%	5%	0,6%	0,6%	0,3%
6%	3,5%	3,4%	3,2%	3,5%	3,5%	-	-	-	-

3.2 Ensayo de inmersión-compresión

Siguiendo lo establecido en la Norma NLT-162, se realizó una serie de ensayos de inmersión-compresión, tanto para el árido reciclado como para el árido natural, sobre grupos de 10 probetas (5 acondicionadas en cámara climática más 5 acondicionadas en baño de agua a 49°C durante 4 días) de modo que cada grupo contuviese una combinación diferente de porcentajes de agua y betún para así determinar unos valores óptimos. Las probetas, tras el acondicionamiento fueron sometidas a una compresión axial hasta rotura obteniéndose un valor medio de resistencia a compresión para cada grupo de 5 probetas. Finalmente, el índice de resistencia conservada fue hallado mediante el cociente de las resistencias de ambos grupos:

$$IRC (\%) = \frac{R_2}{R_1} \cdot 100$$

Siendo R_2 la resistencia a compresión del grupo acondicionado en baño de agua y R_1 la del grupo acondicionado al aire.

3.3 Ensayo de tracción indirecta

Siguiendo las indicaciones y recomendaciones de la Norma UNE-EN 12697-23 las probetas de 50 mm de altura fueron llevadas a una temperatura de 25°C tras lo cual rotas por medio de una carga diametral con un ratio de deformación constante de 50±2 mm/min. Finalmente, la resistencia a tracción indirecta fue determinada mediante la siguiente expresión:

$$ITS = \frac{2 P}{\pi D H}$$

Donde ITS es la resistencia a tracción indirecta (GPa), P es la carga máxima alcanzada en el ensayo (kN), D es el diámetro de la probeta (mm) y H es la altura de la probeta (mm).

3.3 Módulo resiliente

El módulo resiliente se determinó siguiendo la Norma UNE-EN 12697-26 en su modalidad de ensayo de tracción indirecta sobre probetas cilíndricas (Anexo C). En

este caso, se ensayaron las parejas de las probetas ensayadas a tracción indirecta y cada una de ellas, a 2°C, 10°C y 20°C (según la rutina habitual especificada en la Norma). La temperatura de 2°C fue elegida frente a la alternativa de 0°C para evitar la posible congelación del agua alojada en el interior de las probetas, lo cual produciría un comportamiento sensiblemente diferente al comportamiento visco-elastoplástico que se deseaba estudiar.

Tras 10 pulsos de acondicionamiento, las probetas fueron sometidas a 5 ciclos dinámicos de carga diametral con una duración total de 3 s por ciclo, de los cuales 124 ms se corresponden con el aumento de la carga y el resto con un periodo de recuperación de deformaciones visco-elásticas. El módulo de rigidez a tracción indirecta (ITSM) para cada pulso de carga, fue calculado según la siguiente expresión:

$$S_m = \frac{F (\nu + 0,27)}{z \cdot h}$$

Donde S_m es el módulo de rigidez (MPa), F representa el valor máximo de la carga cíclica aplicada (N), z es la amplitud de la deformación horizontal obtenida durante el ciclo de carga (mm), h es el espesor medio de la probeta (mm) y ν es el coeficiente de Poisson (asumido como 0,35). El valor final para cada probeta se halló como la media de los 5 pulsos.

4 RESULTADOS

4.1 Inmersión-compresión

Todos los valores hallados con RCD superan los límites mínimos de resistencia seca (1,2 MPa), resistencia húmeda (1,0 Mpa) y resistencia conservada (60%) de la ATEB para tráfico T3 y T4, así como el 50% genérico que establecía el antigua PG-3 para todo tipo de tráfico (Figuras 2 y 3). También son sensiblemente mayores que los obtenidos con árido natural. Así, los óptimos pasan a ser de 2914,9 kPa y 2379,6 kPa para árido natural a 4411,6 kPa y 3197,7 kPa para árido reciclado, es decir, unos incrementos del 51,3% y 34,4% respectivamente. Sin embargo, debido a que la resistencia húmeda no se incrementa tanto como la seca, los porcentajes de resistencia conservada disminuyen, aunque se debe tener en cuenta que la resistencia

tras acondicionamiento con árido reciclado (3197,7 kPa) sigue siendo 282,8 kPa mayor que la resistencia sin acondicionamiento con árido natural (2914,9 kPa) de lo que se concluye que, pese a que el agua afecte más a las mezclas, el resultado sigue siendo todavía considerablemente mejor con el árido reciclado.

En contraposición, los contenidos óptimos de agua y ligante resultan superiores en el caso de las mezclas con árido reciclado. Este aporte extra de betún/emulsión concuerda con la amplia mayoría de autores y está directamente relacionado con la elevada absorción de los RCD.

4.2 Tracción indirecta

En primer lugar, las resistencias a tracción indirecta son mayores para el árido reciclado que para el árido natural (Figuras 4 y 5). De este modo, la resistencia máxima con reciclado (960 kPa) es del orden de un 13% superior que la resistencia máxima con natural (861 kPa), obteniéndose un efecto beneficioso mediante el uso del reciclado.

Además, mientras que el óptimo de las mezclas con árido reciclado se da para un contenido de betún del 6%, se aprecia como para el árido natural dicho contenido es de solamente un 4%.

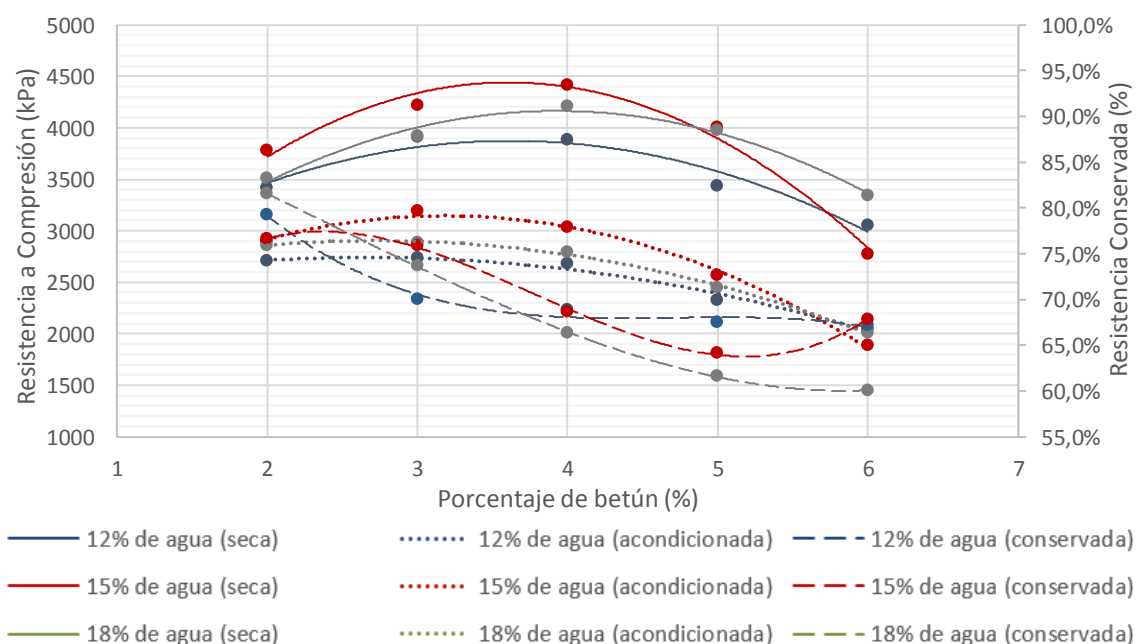


Figura 2. Resistencia a compresión simple (sin y con acondicionamiento en baño de agua) y resistencias conservadas según % de betún y agua para un 100% de árido reciclado

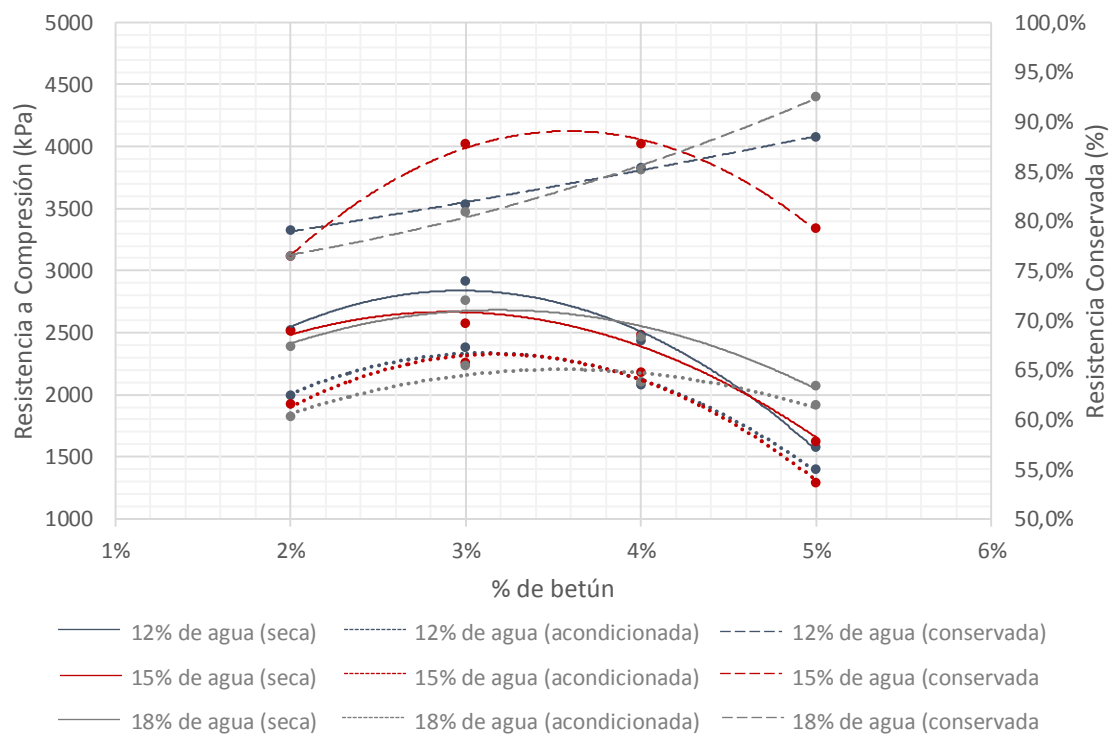


Figura 3 Resistencia a compresión simple (sin y tras acondicionamiento) según % de betún y agua para un 100% de árido natural

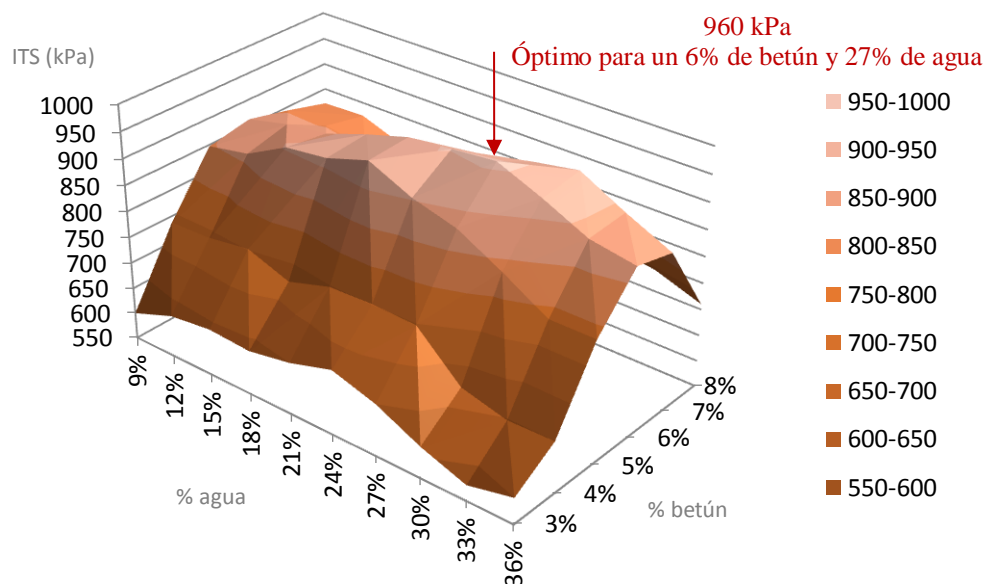


Figura 4. Resistencia a tracción indirecta (en kPa) según contenidos de agua y betún en mezcla (porcentajes referidos a masa de árido seco) para un 100% de árido reciclado

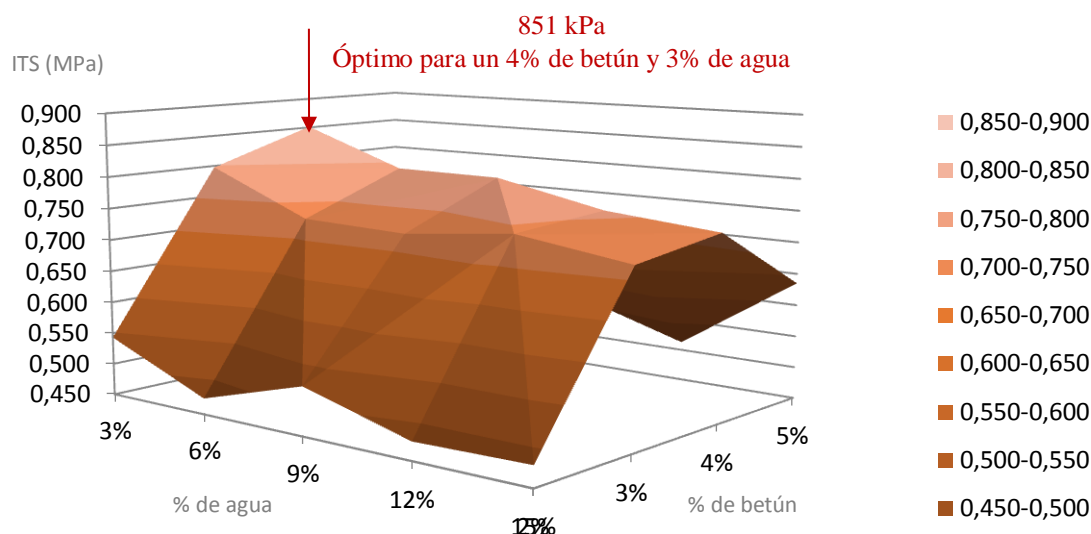


Figura 5. Resistencia a tracción indirecta (en MPa) según contenidos de agua y betún en mezcla (porcentajes referidos a masa de árido seco) para un 100% de árido natural

Tabla 4. Módulos resilientes (MPa) de las mezclas en frío con árido reciclado con diferentes contenidos de agua y betún, a diferentes temperaturas

% betún	% agua en mezcla (antes de compactación y curado)									
	9%	12%	15%	18%	21%	24%	27%	30%	33%	36%
<i>ITSM at T=2°C</i>										
3%	3256	4567	4551	4114	4944	6009	5993	5911	5839	5820
4%	4990	6010	6493	5900	6228	6592	6493	6433	6352	6434
5%	6486	7586	7606	7738	7740	7485	7058	6976	6822	6957
6%	7512	7461	7374	7731	7859	7959	8010	7560	7531	7545
7%	7532	7325	7140	7023	6851	7412	8019	8407	7611	7518
8%	7251	7140	6723	6359	6082	6234	7385	7480	7105	6689
<i>ITSM at T=10°C</i>										
3%	3132	4022	4201	3496	3887	4811	5064	4808	4679	4552
4%	3805	4654	4912	4659	4895	5284	5102	5094	5063	4989
5%	4610	5670	5889	5890	5831	5880	5530	5392	5402	5410
6%	4254	5813	5448	5950	6007	5980	6010	5941	5693	5607
7%	5778	5468	5153	5199	5105	5170	5492	6044	5741	5599
8%	5632	5254	4790	4506	4220	4400	4717	5015	4913	4720
<i>ITSM at T=20°C</i>										
3%	2379	2622	2490	2710	3043	3312	3596	3566	3558	3570
4%	2741	3013	3318	3182	3380	3595	3667	3657	3601	3583
5%	3024	3723	4024	3854	3912	4001	3766	3640	3618	3553
6%	3515	3642	3418	3866	3896	3786	4006	3799	3586	3451

7%	3403	3321	2844	2987	3079	2983	3421	3812	3490	3213
8%	3288	2837	2668	2394	2311	2269	2565	2707	2724	2526

4.3 Módulo resiliente

En primer lugar, las rigideces tienden a ser mayores en mezclas con árido reciclado, llegando a alcanzar valores superiores a los 4000 MPa a 20°C, mientras que con árido natural, la máxima rigidez rondó los 2500 MPa (Tablas 4 y 5). Esta mayor rigidez, casi comparable a la de las mezclas en caliente, debe entenderse, sin embargo, como un valor potencial que solamente se alcanzaría para unos determinados contenidos de agua y betún. En caso de resultar excesivo para una determinada aplicación, como es el caso de un pavimento flexible con explanadas de baja calidad, sería conveniente limitar dicho módulo, lo cual es fácilmente conseguible con bajar el contenido de agua y betún.

Tabla 5. Módulos resilientes (MPa) de las mezclas en frío con árido natural con diferentes contenidos de agua y betún, a diferentes temperaturas

% betún	% agua en mezcla (antes de compactación y curado				
	3%	6%	9%	12%	15%
<i>ITSM at T=2°C</i>					
2%	6892	5980	5938	6528	6471
3%	9821	10431	9375	9560	9852
4%	11096	10184	9521	8810	10004
5%	8303	6189	5777	6905	8939
<i>ITSM at T=10°C</i>					
2%	4203	3608	3478	3784	3944
3%	5457	5882	5529	5684	5602
4%	6230	5678	5495	4918	5699
5%	4404	3167	2954	3751	5059
<i>ITSM at T=20°C</i>					
2%	1844	1619	1387	1469	1691
3%	2351	2298	2137	2308	2374
4%	2537	2197	2137	1795	2184
5%	1459	963	931	1310	1850

Además, se aprecia como la rigidez máxima se da para un contenido de betún considerablemente inferior en mezclas con árido natural (4% frente al 7%). El contenido de agua con el que se consigue el mayor módulo es también mucho mayor en el caso del

árido reciclado. De hecho, mientras que para el árido natural dicho valor fue el mínimo ensayado (3% de agua), para el árido reciclado fue necesario llegar al 30%.

Por otro lado, la temperatura afecta mucho más a las mezclas con árido natural, siendo el módulo máximo a 20°C, 1487 MPa menor que con árido reciclado, y a 2°C 2689 MPa mayor. Así, con árido natural, las pérdidas de rigidez por pasar de 2°C a 20°C llegan a ser superiores al 80% del valor inicial, mientras que con árido reciclado resultaron, como mucho, del 65%.

5 CONCLUSIONES

En términos generales, los RCD presentan pobres propiedades como áridos (por ejemplo baja resistencia a la fragmentación) pero su incorporación en mezclas bituminosas en frío produce una mejora en las propiedades mecánicas de las mismas. Así, los RCD muestran un gran potencial de mercado, pasando de ser un desecho a una nueva materia prima que aporta beneficios ingenieriles.

Las mezclas en frío con áridos reciclados de RCD son más versátiles que las que contienen áridos naturales, siendo válidas para un mayor rango de condicionantes ambientales (temperatura, lluvia, etc.) y de servicio (cargas de tráfico). Así, se comportan mejor ante variaciones de temperatura o en presencia de elevada humedad.

Propiedades mecánicas como la resistencia a compresión simple, resistencia a tracción indirecta y módulo resiliente mostraron mejoras considerables al sustituir el árido natural por áridos reciclados de RCD.

La desventaja fundamental encontrada es que, debido a la gran absorción de los RCD, requieren de un mayor consumo de ligante y agua para desarrollar su máximo potencial. No obstante, tal y como se ha visto, con contenidos menores y similares a los de las mezclas con áridos naturales, se siguen obteniendo resultados satisfactorios.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer la financiación recibida por proyecto BIA2010-17751 y la Ayuda FPI (Ref. BES-2011-044377) del Ministerio de Economía y Competitividad, así como la donación de los áridos reciclados por parte del Grupo GESTÁN y de la emulsión bituminosa por parte de ECOASFALT.

REFERENCIAS

- .- ATEB (Asociación Técnica de Emulsiones Bituminosas). Grava-emulsión. Monografía
- .- ATEB (Asociación Técnica de Emulsiones Bituminosas). Grava-emulsión. Pliego Técnico
- .- Del Río M, Izquierdo P, Salto I, Cruz JS (2010). La regulación jurídica de los residuos de construcción demolición (RCD) en España. El caso de la Comunidad de Madrid. Informes de la Construcción 62(517), 81-86
- .- González-Fontecha B, Martínez-Abella F (2007). Shear strength of recycled concrete beams. Construction and Building Materials 21, 887-893
- .- González-Fontecha B, Martínez-Abella F (2008). Concretes with aggregates from demolition waste and silica fume. Materials and mechanical properties. Building Environment 43, 429-437
- .- II Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición (IIPNRCD), 2007–2015. Anexo 6 del Borrador del Plan Nacional Integrado de Residuos (PNIR). Ministerio de medio Ambiente
- .- Pasandín AR, Pérez I (2013). Laboratory evaluation of hot-mix asphalt containing construction and demolition waste. Construction and Building Materials 43, 497-505
- .- Pasandín AR, Pérez I (2014c). Mechanical properties of hot-mix asphalt made with recycled concrete aggregates coated with bitumen emulsion. Construction and Building Materials 55, 350-358

.- Pasandín AR, Pérez I (2015). Overview of bituminous mixtures made with recycled concrete aggregates. Construction and Building Materials 74, 151-161

.- Pérez I, Gallego J, Toledano M, Taibo J (2010). Asphalt mixtures with construction and demolition debris. Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Transport 163, 165-174